

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
14 juillet 2005 (14.07.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2005/064300 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ : **G01L 1/24**,
F17D 5/00, E21B 17/00

(71) Déposant (*pour tous les États désignés sauf US*) : **COM-
MISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE** [FR/FR];
31-33, rue de la Fédération, F-75752 PARIS 15ème (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2004/050736

(72) Inventeurs; et

(22) Date de dépôt international :
20 décembre 2004 (20.12.2004)

(75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) : **MAGNE**,
Sylvain [FR/FR]; 10, rue Jean-Pierre Timbaud, F-92320
CHATILLON (FR). **FERDINAND, Pierre** [FR/FR]; 96,
rue des martyrs de la Résistance, F-78800 HOUILLES
(FR). **DANIEL, Pierre-Jean** [FR/FR]; 17, rue de Paris,
F-91570 BIEVRES (FR).

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

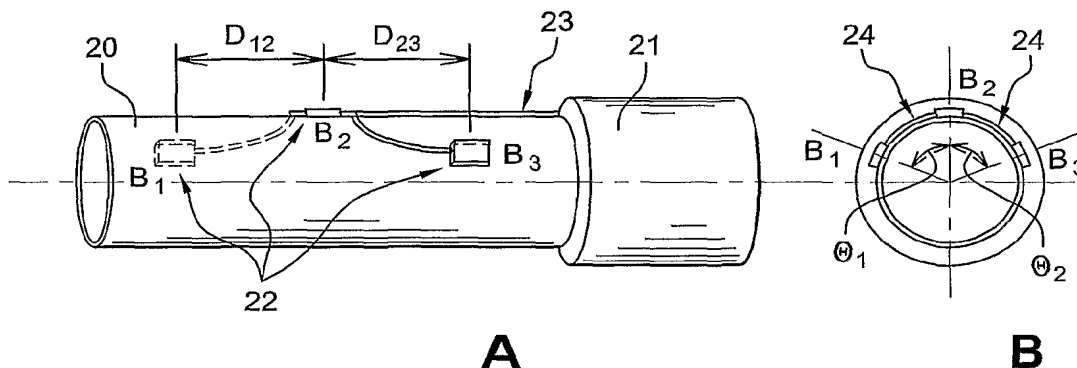
(30) Données relatives à la priorité :
0351168 22 décembre 2003 (22.12.2003) FR

(74) Mandataire : **POULIN, Gérard**; Brevatome, 3, rue du
Docteur Lancereaux, F-75008 PARIS (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: INSTRUMENTED TUBULAR DEVICE FOR THE TRANSPORT OF A PRESSURISED FLUID USING BRAGG GRATING ROSETTES

(54) Titre : DISPOSITIF TUBULAIRE INSTRUMENTE POUR LE TRANSPORT D'UN FLUIDE SOUS PRESSION PAR DES ROSETTES DE BRAGG



(57) Abstract: The invention relates to an instrumented tubular device for the transport of a pressurised fluid, for example, in the field of oil exploration and gas or hydrocarbon transportation. The inventive device comprises a tube (20) in which the fluid circulates, said tube having the following means associated therewith, namely: means for measuring the main deformations in the tube and means for measuring the temperature of the fluid in the tube. Said measuring means are solidly connected to the surface of the tube and are transferred to an electronic measuring system via at least one optical transfer cable. According to the invention, the aforementioned measuring means take the form of means for assembling at least two non-parallel optical fibres comprising at least three assemblies (B1, B2, B3) of at least two optical gauges having Bragg gratings which are fixed at at least three measuring points (22) and which are connected to the optical transfer cable (23) by means of optical fibres. In addition, at least one of said assemblies also comprises a temperature gauge.

(57) Abrégé : L'invention concerne un dispositif tubulaire instrumenté pour le transport d'un fluide sous pression notamment dans le domaine de la prospection pétrolière, et dans celui du transport de gaz ou d'hydrocarbures. Ce dispositif comprend un tube (20) dans lequel circule ce fluide auquel sont associés des moyens de mesure des déformations principales de ce tube,

[Suite sur la page suivante]



WO 2005/064300 A1



- (81) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
- (84) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,

FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

et des moyens de mesure de la température du fluide dans le tube. Ce tube est équipé de ces moyens de mesure solidaires de sa surface et déportés par au moins un câble optique de déport vers un système de mesure électronique. Ces moyens de mesure sont des moyens d'assemblage d'au moins deux fibres optiques non parallèles qui comprennent au moins trois ensembles (B1, B2, B3) d'au moins deux jauges optiques à réseaux de Bragg fixés en au moins trois emplacements (22) de mesure et reliés au câble optique de déport (23) par des fibres optiques. Au moins un ensemble comprend de plus une jauge de température.

DISPOSITIF TUBULAIRE INSTRUMENTE POUR LE TRANSPORT D'UN FLUIDE SOUS PRESSION
PAR DES ROSETTS DE BRAGG

DESCRIPTION

DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention concerne un
5 dispositif tubulaire instrumenté pour le transfert d'un
fluide sous pression, notamment dans le domaine de la
prospection pétrolière, et dans celui du transport de
gaz ou d'hydrocarbures.

10 **ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE**

Dans le domaine de la prospection
pétrolière, les gisements ont tendance à se raréfier.
L'exploitation des nouveaux gisements s'effectue de
plus en plus souvent en mer ("off-shore"), voire en
15 haute mer et en grande profondeur ("deep off-shore").
Dans ce contexte, l'assistance en temps réel aux
services de production des champs pétroliers "offshore"
et "deep off-shore" est un besoin nouveau et spécifique
aux développements consécutifs à une telle
20 exploitation.

Dans l'objectif de réduire l'encombrement
et les coûts, les tubes utilisés ont un fonctionnement
proche de leurs limites de conception. Les contraintes
et la fatigue accumulées sont donc importantes.

25 Comme illustré sur la figure 1, le fluide
hydrocarbure sous pression (typiquement 70 bar ou plus)
et sous haute température (typiquement 100°C ou plus)
est extrait d'un ou plusieurs réservoirs 10 par forage

(puits 11) puis convoyé via des lignes d'écoulement 12 vers des "risers" ("tour riser" 13, "Riser catenaire" 14) pour y être remonté vers la surface. Ce fluide est alors pré-traité dans une station de collecte 15 avant d'être renvoyé via une ligne d'export 16 vers une base de chargement 17 pour pétrolier 18.

Lors d'une exploitation en grands fonds, les pressions de fluide sont inférieures à la pression externe exercée par l'eau sur le tube.

10 Le coût élevé de telles installations, ainsi que celui de leur fonctionnement et de leur maintenance incite les exploitants pétroliers à anticiper leurs modes de dégradation et les causes de rupture d'alimentation en fluide pétrolier dans le but
15 de garantir un état opérationnel de toute la chaîne de production.

En particulier, les exploitants pétroliers doivent anticiper la formation de bouchons d'hydrate susceptibles d'apparaître dans des conditions
20 thermodynamiques bien précises, fonction de la température et de la pression interne du fluide. De tels bouchons, lorsqu'ils sont formés, peuvent conduire à une obstruction de conduite et induire des coûts importants. Il est donc nécessaire de surveiller la
25 pression interne et la température du fluide afin de prévenir l'apparition de tels bouchons.

Par ailleurs, le besoin en instrumentation ne s'exprime pas seulement au travers du maintien de la veine fluide, en contrôlant ainsi la température en des
30 points critiques répartis le long de l'écoulement, mais également au niveau du suivi des efforts (contrôle de

la fatigue) et de l'optimisation du régime de production. Une telle obligation nécessite une détection de toute variation soudaine de pression.

5 La vitesse de déplacement d'un bouchon d'hydrate peut être estimée en mesurant le temps que met un front de surpression correspondant pour se propager d'un point de mesure à un autre situé à proximité (par exemple quelques mètres plus loin).

10 Les tubes utilisés pour la réalisation des conduites présentent un diamètre typique de 12 pouces (environ 30 cm) et une épaisseur de paroi de 3/4 de pouce (environ 19 mm). Ils forment des tronçons de 12 m à 48 m de long. Ces tubes sont calorifugés afin de réduire au maximum les pertes thermiques par conduction
15 avec l'extérieur (eau à environ 4°C) et maintenir ainsi le fluide à une température suffisamment élevée pour prévenir la formation de bouchons d'hydrate.

Les exploitants pétroliers sont donc motivés par tout développement d'une instrumentation
20 novatrice, de fiabilité accrue, de mise en oeuvre aisée qui présente un coût optimisé, qui leur permette de contrôler les phénomènes majeurs intervenant dans les grands fonds et donc, in fine, d'optimiser leurs moyens de production et leur productivité.

25 Le problème que se propose de résoudre l'invention concerne donc la mise au point d'un système complet de mesure de température, de pression et de variation de pression interne du fluide circulant à l'intérieur d'une conduite de transport ainsi que son
30 suivi en fatigue (traction et flexion) dans un environnement "offshore" déporté (plusieurs kilomètres)

sous haute température (parfois plus de 120°C) et haute pression (plusieurs centaines de bar).

Les solutions de l'art connu employant des capteurs électriques (accéléromètres, jauges électriques de déformations, thermocouples) ne sont pas considérées comme fiables comme outils de mesure permanents pour des températures excédant 120°C. Leurs durées de vie sont trop courtes (les exploitants demandent actuellement une durée de fonctionnement garantie sur 20 ans). De plus, le coût de remplacement de tels capteurs électriques est élevé, car un arrêt de production peut-être rendu nécessaire dans le cas de l'obstruction d'une conduite par un bouchon d'hydrate. Enfin, de tels capteurs électriques nécessitent une alimentation déportée ainsi qu'une conversion électronique locale permettant un transfert du signal sur une longue distance. Les systèmes de mesures mis en place aujourd'hui nécessitent, de par leur diversité, des réseaux associés différents pour transporter les informations correspondantes (la récupération des informations se fait par ROV ("Remote Operating Vehicle") ou par ombilicaux dédiés), ce qui complique considérablement le câblage, le traitement et l'archivage des données et interdit un fonctionnement en temps réel.

Les exploitants pétroliers souhaitent disposer d'une instrumentation tolérante au procédé d'assemblage et aux conditions d'emploi "off-shore", permettant de réaliser des mesures à distance (déport multi-kilométriques) de la distribution de température et des déformations axiales (efforts de traction et de

flexion) et transverses (pressions) des tubes utilisés. Les capteurs doivent donc être passifs (sans alimentation électrique déportée) et reliés à la surface par un câble unique pouvant contenir plusieurs fibres optiques. Une telle instrumentation doit être apte à fournir en temps réel les informations nécessaires au maintien de la veine fluide (température, pression interne et variation de pression du fluide) et à garantir l'état opérationnel des installations (mesure de la déformation axiale et de la flexion, orientation et amplitude du moment de flexion).

Plusieurs solutions technologiques utilisant des capteurs optiques permettent de résoudre un tel problème de mesure de température, de pression, et de variation de pression interne circulant à l'intérieur d'une conduite, ainsi que son suivi en fatigue. Ces solutions peuvent être des systèmes de mesure répartie, c'est-à-dire de mesure continue le long d'une fibre optique (DTS ("Distributed Temperature Sensor")-Raman et Brillouin-OTDR ("Optical Time Domain Reflectometry"), ou des systèmes de mesure discrète ou ponctuelle (capteurs interférométriques et capteurs à réseaux de Bragg).

25

1. Systèmes de Mesure répartie

Le système DTS-Raman ne répond que partiellement au problème posé puisqu'il ne mesure strictement que la température. Un tel système doit donc être accompagné d'un ou plusieurs autres systèmes de mesure de déformation, ce qui augmente le coût du

30

5 système global et complexifie le traitement de données.
Par contre, les systèmes Brillouin-OTDR permettent de
répondre intégralement au cahier des charges d'une
mesure en milieu pétrolier car ils donnent
10 potentiellement accès à des mesures réparties de
température et de déformation le long d'une fibre.
Toutefois, de tels systèmes sont peu nombreux et très
chers, et ne permettent de réaliser que des mesures
statiques (temps de réponse évoluant de quelques
15 minutes à quelques heures). Ils ne permettent donc pas
de détecter des variations de pressions subites sur
quelques dixièmes de seconde.

2. Systèmes de mesure discrète

15 Outre des capteurs interférométriques en
lumière blanche ou cohérente les capteurs les plus
utilisés dans le secteur pétrolier sont les capteurs à
réseaux de Bragg.

Un réseau de Bragg consiste, en effet, en
20 une perturbation périodique de l'indice de réfraction
dans un guide optique, par exemple une fibre optique.
Il se comporte comme un miroir spectralement sélectif.
Ainsi, lorsqu'un signal optique à large bande spectrale
est injecté dans une fibre optique au sein de laquelle
25 a été photo-inscrit un réseau de Bragg, seule une fine
raie spectrale (environ 200 pm de large) extraite du
signal incident est réfléchie tandis que le reste du
signal est transmis sans altération. Les
télécommunications optiques utilisent prioritairement
30 les longueurs d'ondes proches de 1,55 μm (bande C) et
la plupart des composants optiques (passifs et actifs)

ont été développés pour ce domaine de longueur d'onde.

Le document référencé [2] décrit ainsi des transducteurs à réseaux de Bragg disposés le long de rainures ménagées dans des renforts d'acier d'annulaires d'un "câble riser". Ces transducteurs sont sensibles à la pression interne, aux déformations axiales, et à la flexion d'un tel câble. Afin de séparer ces contributions, deux réseaux sont fixés de façon diamétralement opposée sur chaque renfort. Ce principe convient pour des tubes de tours ("risers") avec armatures métalliques mais ne convient absolument pas pour les tubes métalliques.

L'invention a pour objet de résoudre les problèmes évoqués précédemment, et ce d'une façon globale, en proposant un dispositif tubulaire instrumenté qui permette de mesurer tous les paramètres utiles à l'exploitant, à savoir la pression interne statique de fluide, sa température, la surpression interne de fluide, le débit de fluide, le chargement longitudinal du tube, le moment de flexion et l'orientation en présentant une architecture optimisée, c'est-à-dire un nombre minimal d'emplacements et de capteurs.

25

EXPOSÉ DE L'INVENTION

L'invention concerne un dispositif tubulaire instrumenté pour le transport d'un fluide sous pression comprenant un tube dans lequel circule ce fluide auquel sont associés des moyens de mesure des déformations principales de ce tube, et des moyens de

30

mesure de la température du fluide dans le tube, caractérisé en ce que ce tube est équipé de ces moyens de mesure solidaires de sa surface et déportés par au moins un câble optique de déport vers un système de
5 mesure optoélectronique, en ce que ces moyens de mesure sont des moyens d'assemblage d'au moins deux fibres optiques non parallèles, qui comprennent au moins trois ensembles d'au moins deux jauges optiques à réseaux de Bragg, ces au moins trois ensembles étant fixés en au
10 moins trois emplacements de mesure répartis le long du tube, reliés entre eux et reliés au câble optique de déport par des fibres optiques, et en ce que au moins un ensemble comprend, en outre, une jauge de température.

15 Ces moyens de mesure peuvent être préassemblés sur un support ou fixés directement sur le câble de déport.

Ces moyens de mesure peuvent être assemblés pour former au moins une rosette. Avantageusement
20 chaque rosette forme un capteur flexible à deux dimensions, formée par exemple de feuilles de polyimide assemblées.

Avantageusement chaque ensemble comprend trois jauges de mesure des déformations du tube.

25 Chaque capteur comprend une partie de mesure des déformations et une partie de mesure de la température. La partie de mesure des déformations peut être constituée d'une fibre optique monomode, sur laquelle ont été photo-inscrits des réseaux de Bragg,
30 enroulée et maintenue collée entre deux feuilles par exemple de polyimide ou de « Kapton », les entrées-

sorties de fibre étant protégées par des capillaires par exemple de plastique, les parties de fibre comportant les réseaux de Bragg étant découvertes. La partie de mesure de la température peut comprendre un
5 réseau de Bragg collé sur une plaquette métallique. Avantageusement la plaquette métallique est de même nature que le métal du tube.

Dans un premier mode de réalisation le dispositif de l'invention comprend au moins trois
10 boîtiers de mesure, dans lesquels sont disposés respectivement trois capteurs, isolés de la pression hydrostatique externe reliés par des raccords tubulaires. Le boîtier central de chaque ensemble est relié à l'instrumentation de mesure par un câble
15 optique de déport. Les boîtiers et les raccords sont soudés entre eux pour former un ensemble rigide. Le câble de déport est constitué d'un tube d'acier inoxydable rempli de gel et contenant plusieurs fibres optique monomodes, d'une armure en fils d'acier séparés
20 par des gaines de plastique. Le boîtier central incorpore une embase destinée à effectuer le raccord de connexion du câble optique de déport.

Dans un second mode de réalisation, le dispositif de l'invention comprend au moins trois
25 capteurs recouverts d'un revêtement de protection. Ce revêtement peut être un revêtement polymère d'épaisseur comprise entre 3 et 4 centimètres. Une boîte de dérivation effectue la liaison entre les capteurs de chaque ensemble et un câble optique principal relié à
30 l'instrumentation de mesure. La reprise d'effort sur le câble principal est effectuée par cerclage de ce câble

le long du tube. Le câble de déport est inclus dans le revêtement de protection.

Le dispositif de l'invention peut être utilisé dans le domaine de la prospection pétrolière
5 "off-shore", et dans le domaine du transport de gaz ou d'hydrocarbures.

Le dispositif de l'invention bénéficie des avantages d'une métrologie par réseaux de Bragg, c'est-
10 à-dire :

- pas d'interférences électromagnétiques (mesure optique),
- multiplexage et lecture en longueur d'onde (signature spectrale indépendante des
15 fluctuations de puissance optiques),
- mesures ponctuelles,
- déport important de la mesure (portées kilométriques) et flexibilité de câblage,
- stabilité dans le temps et durabilité en
20 environnements sévères,
- mesures sur une gamme de températures usuelle (-20°C , $+90^{\circ}\text{C}$),
- non nécessité d'une connexion permanente (instrumentation connectable et déconnectable à
25 volonté) du fait de la mesure absolue des longueurs d'onde,
- très faibles pertes d'insertion autorisant une mise en série des capteurs le long d'une seule ligne de mesure,
- 30 - optimisation du coût du point de mesure en vertu du multiplexage par une seule unité

d'acquisition commune à tous les capteurs,

- mesures multi-paramètres (température, déformations) uniformisées dans une seule unité d'acquisition et un seul protocole de traitement et d'affichage (cohérence dans l'analyse et le stockage des données).

Les différents domaines concernés par le dispositif de l'invention sont les industries pétrolière et gazière et en général toutes les industries nécessitant un transport de fluide par tubes ou "pipelines" sur de longues distances dans des conditions d'opération terrestres ou en eau profonde ("deep off-shore").

En prospection pétrolière, l'invention trouve une application immédiate dans la surveillance de la fatigue mécanique induite par le chargement et par l'activité marine sur les lignes d'export ("export lines") et les "risers" ("riser tower", "catenary risers"), notamment à proximité des bouées de chargement et du point de contact avec le sol ("Touch Down Point").

Une autre application importante de l'invention concerne le contrôle de production à travers le suivi de la veine fluide en s'assurant que les conditions de pression et de température sont normales afin de prévenir toute apparition d'un bouchon dans la conduite ainsi que des phénomènes de perturbation d'écoulement ("slugging") pouvant conduire à une interruption de la production. La répartition des emplacements de mesure le long du tube est originale en

ce sens qu'elle permet de déterminer l'amplitude de flexion et son orientation et d'établir simultanément avec le même schéma l'autocorrélation temporelle des surpressions afin d'en déduire le débit de fluide. Ceci
5 constitue un progrès notable car les dispositifs de l'art connu mettent en oeuvre des solutions séparées, voire fondées sur des principes ou des technologies différentes, pour parvenir aux mêmes objectifs. L'invention permet d'obtenir toutes les informations
10 recherchées (température, chargement axial, flexion et orientation, pression et surpression interne, débit de fluide) avec un nombre et un placement optimisés de capteurs.

L'invention trouve également une
15 application immédiate dans les réseaux de transports terrestres de gaz et d'hydrocarbures. Certains réseaux (par exemple en Alaska ou en zones arctiques ou sub-arctiques) ne sont pas surveillés et peuvent se rompre ou se fissurer à cause de phénomènes de corrosion et de
20 fatigue thermomécanique (par exemple, les tubes posés sur le permafrost).

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La figure 1 illustre un schéma type d'une
25 exploitation pétrolière sous-marine.

Les figures 2A et 2B illustrent une portion instrumentée, après élimination de la zone calorifugée, du dispositif de l'invention dans une vue de côté et dans une vue en coupe.

30 Les figures 3A, 3B et 3C illustrent des moyens de mesure du dispositif de l'invention, qui sont

de moyens d'assemblage d'au moins deux fibres optiques non parallèles ; la figure 3A illustrant un exemple de rosette à réseaux de Bragg de type "Delta", et les figures 3B et 3C deux variantes de réalisation.

5 Les figures 4A et 4B illustrent la constitution de rosettes utilisées pour l'instrumentation du dispositif de l'invention dans une vue de dessus et dans une vue en coupe A-A.

10 Les figures 5A et 5B illustrent le boîtier principal et la connexion de celui-ci avec le câble de déport dans un premier mode de réalisation du dispositif de l'invention, dans une vue en coupe transversale et dans une vue en coupe B-B.

15 Les figures 6A et 6B illustrent le raccordement entre le câble de déport et un capteur selon un second mode de réalisation du dispositif de l'invention, dans une vue en coupe transversale et dans une vue en coupe longitudinale.

20 EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

Le dispositif tubulaire instrumenté (ou "smart pipeline") de l'invention est un tube traditionnel, partiellement découvert puis recouvert par son calorifuge, équipé d'un ensemble de jauges
25 optiques pré-positionnées puis collées sur sa surface et déportées par un ou plusieurs câbles optiques sous-marins vers un système de mesure optoélectronique. Ce système de mesure peut être placé en surface, sur terre ou sur mer.

30 Cet ensemble de jauges comprend des rosettes, qui sont des assemblages de plusieurs jauges

permettant de déterminer les déformations selon différentes orientations du support, ici un tube, sur lequel elles sont fixées suivant plusieurs directions, comme décrit dans le document référencé [3]. Ce document décrit, en effet, un micro-système optique de type rosette plane de jauges de contrainte à guides diélectriques, destiné à mesurer un système de contraintes appliqué à une pièce, dans lequel, la pièce étant une pièce à contrainte purement longitudinale, au moins une rosette est formée d'au moins deux jauges de contraintes à guides diélectriques, et dans lequel un circuit de calcul permet de déterminer ladite contrainte par résolution d'un système d'équations.

Dans la suite de la description les assemblages de jauges considérés à titre d'exemple sont des rosettes, comme illustré sur la figure 3A. Mais les moyens de mesure du dispositif tubulaire instrumenté de l'invention sont plus généralement des moyens d'assemblage d'au moins deux fibres optiques non parallèles, comme illustré sur les figures 3A, 3B et 3C, qui peuvent être préassemblés sur un support ou fixés directement sur le câble de déport.

Dans le dispositif de l'invention chaque rosette peut être réalisée sous la forme d'un capteur flexible à deux dimensions formé, par exemple, de feuilles de polyimide assemblées. Ce capteur comprend trois jauges de mesure de déformation qui permettent de déterminer les deux déformations principales (transverse et axiale) indépendamment du positionnement angulaire de la rosette sur le tube, de manière à

fixer, par exemple coller, ce capteur sur ce tube sans précaution particulière, dans un environnement industriel non maîtrisé (fabrication des tubes). Ce capteur peut comprendre deux jauges seulement mais orientées précisément l'une le long de l'axe, l'autre transversalement. Par ailleurs, une jauge de température peut être également insérée dans ce capteur afin de mesurer sa température au plus près des jauges de déformation, et de permettre de séparer les contributions thermiques des contributions purement mécaniques (déformations transverse et axiale). Dans la suite de la description le terme "capteur" fait référence à un tel capteur de type rosette.

Le dispositif de l'invention est équipé d'au moins trois emplacements de mesure, protégeant les capteurs des chocs externes, reliés entre eux et reliés à un câble de déport (vers la surface) par des fibres optiques. Ces emplacements sont disposés en différentes positions selon l'axe du tube et orientées selon plusieurs angles de sa section (avantageusement tous les 60°).

Dans un exemple de réalisation, le dispositif de l'invention comprend un tube de 24 mètres de long et de 12 pouces (30 centimètres) de diamètre environ équipé d'emplacements de mesure répartis. Tous les emplacements abritent un capteur. De façon avantageuse, l'emplacement central comporte un rosette B2 à quatre jauges (trois jauges de déformation et une jauge de mesure de température) tandis que les deux emplacements latéraux comportent chacun une rosette B1 ou B3 à trois jauges de déformation. La mesure de

température, qui est considérée homogène sur l'ensemble de la zone de mesure, peut être uniquement assurée par la rosette centrale B2. Le dispositif, dans cette portion instrumentée, comprend donc au moins 10 jauges.

5 Dans le cas où la température ne serait pas homogène de façon circonférentielle, chaque rosette peut contenir trois jauges de déformation et une jauge de température, ce qui conduit à 12 jauges dans cette portion instrumentée.

10 Le dispositif de l'invention est destiné à être insérable directement sur site de production pétrolière sans intervention spécialisée. II peut fournir de manière déportée, via une ou des fibres optiques, les mesures suivantes:

- 15 - la température interne du fluide circulant dans le tube,
- la pression et la variation interne de pression du fluide,
- le chargement axial,
20 - le rayon de courbure de flexion du tube,
- l'orientation de cette flexion par rapport à sa section.

Il permet en outre d'effectuer une débitmétrie par analyse dynamique des ondes de
25 pression.

Le dispositif de l'invention comprend deux modes de réalisation selon que les emplacements sont ou non isolés de la pression hydrostatique externe
30 (profondeur d'eau). Dans un premier mode de réalisation, trois boîtiers de mesure isolés de la

pression hydrostatique externe, et reliés par des raccords tubulaires sont disposés en ces emplacements de mesure. Dans un second mode de réalisation, trois capteurs recouverts d'un revêtement polymère de 3 à 4 centimètres d'épaisseur les protégeant du milieu marin, des chocs et des frottements sont disposés en ces emplacements de mesure.

Premier mode de réalisation de l'invention

10 Dans ce premier mode de réalisation les trois emplacements 22 sont occupés par des boîtiers, dans lesquels sont disposés respectivement trois capteurs, isolés de la pression hydrostatique externe. Chaque portion instrumentée du dispositif de
15 l'invention, illustrée sur la figure 2 après élimination du calorifuge 21, comprend un ensemble pré-assemblé constitué d'au moins un boîtier central B_2 et de deux boîtiers latéraux B_1 et B_3 , de raccords tubulaires préformés 24 (au diamètre du tube) reliant
20 les boîtiers entre eux et d'une fibre optique de déport 23 reliant le boîtier central B_2 à l'instrumentation de mesure située en surface. Les boîtiers sont installés le long de l'axe du tube (par exemple tous les décimètres) et selon différentes orientations
25 angulaires. Dans le câble de déport vers l'instrumentation en surface, à une fibre optique correspond donc un ensemble de trois boîtiers.

La figure 2B montre une répartition des boîtiers à 60° ($\theta_1 = \theta_2 = 60^\circ$), à titre d'exemple. Mais
30 d'autres configurations angulaires sont possibles. De même, la répartition et le mode d'interconnexion des

boîtiers peut être différente. Le câble de déport 23 peut être connecté au boîtier B₃ ou au boîtier B₁ par exemple. Ces boîtiers B₁, B₂ et B₃, de dimensions typiques (hauteur x longueur x largeur=4 cm x 20 cm x 5 10 cm) servent à pré-positionner les capteurs pour faciliter leur mise en place chez le fabricant de tube et introduction d'un polymère d'étanchéité. Ils ont aussi une fonction mécanique de reprise d'effort.

La procédure de montage du dispositif de 10 l'invention comporte alors les étapes suivantes :

- préparation un ensemble pré-assemblé boîtiers +raccords,
- adaptation de cet ensemble sur le tube, par soudage,
- 15 - assemblage des composants optiques sur le tube 20 (chez le fabricant de tube) avec recouvrement par le calorifuge 21,
- étalonnage en température, chargement et flexion avant transport et installation sur site de 20 production.

Second mode de réalisation de l'invention

Dans ce second mode de réalisation, le dispositif de l'invention est instrumenté par des 25 capteurs situés en des emplacements similaires à ceux du premier mode de réalisation. Les capteurs sont, cette fois, collés directement sur le tube sans boîtiers de protection contre la pression hydrostatique externe. Les capteurs d'une même portion instrumentée 30 du dispositif de l'invention, ou "double-joint", sont connectés entre eux par un câble optique de déport, qui

est connecté à un câble optique principal au niveau d'une boîte de dérivation, positionnée en tête de portion instrumentée. Les capteurs, et le câble optique de déport sont noyés dans un revêtement qui les rend
5 hermétiques au milieu extérieur. Le câble optique principal relie la boîte de dérivation et l'instrumentation située en surface. Cette boîte de dérivation permet de garantir l'étanchéité des câbles optiques principal et de déport. La distribution des
10 fibres optiques le long du tube en de multiples portions instrumentées est prévue en phase d'industrialisation.

La procédure de montage du dispositif de l'invention comprend alors la préparation des
15 composants de mesure. Une fois ces composants mis en place, un revêtement est rapporté sur toute la partie découverte afin de protéger ces composants, ainsi que les connexions de câbles optiques. Le calorifuge est alors rapporté sur ce revêtement afin d'isoler
20 l'ensemble des chocs extérieurs et assurer sa protection thermique. La reprise d'effort sur le câble optique principal est effectuée par cerclage de celui-ci le long du tube.

25 On va, à présent, considérer plus en détail les étapes de la procédure de montage du dispositif de l'invention, dans ces deux modes de réalisation.

1. Préparation des composants de mesure

30 A. Réalisation des rosettes à réseaux de Bragg

Comme illustré sur les figures 4A et 4B, on

utilise un capteur, qui comporte une première partie de mesure des déformations 40 constitué d'un enroulement de fibre monomode 41 (formant un triangle équilatéral) sur laquelle ont été photo-inscrits des réseaux de Bragg 42, 43 et 44 par des techniques connues (masque de phase et laser UV) en des positions bien déterminées le long de celle-ci. Cette fibre 41 est maintenue enroulée par collage entre deux feuilles par exemple de polyimide ou encore de « Kapton ».

Les configurations les plus utilisées de ces rosettes sont en effet les rosettes « delta » constituées de trois réseaux 31, 32 et 33 ou 42, 43 et 44 disposés à 120° (ou 60°) les uns par rapport aux autres, comme illustré sur les figures 3A et 4A, et les rosettes "rectangulaires" faisant intervenir un angle de 45° .

Les parties de la fibre 41 comportant les réseaux de Bragg 42, 43, 44 sont découvertes pour permettre un collage direct fibre-structure (sans interface « Kapton »).

Ce capteur comporte également une seconde partie de mesure de température 45 qui comprend un réseau 46 collé sur une plaquette métallique 47, par exemple en acier de même constitution que l'acier ayant servi à construire le tube (par exemple des aciers X52 de coefficient de dilatation thermique $K \sim 11.10^{-6} K^{-1}$).

La plaquette métallique 47 est maintenue en contact thermique avec la surface du tube 50 afin de garantir que la partie de mesure de la température 45 est à la même température que la partie de mesure des déformations 40. Un procédé d'auto-compensation permet

de supprimer l'effet induit par la température sur le capteur lui-même.

Pour éviter une rupture de la fibre 41 par cisaillement, les entrées-sorties de celle-ci sont protégées grâce à des capillaires de plastique 51 (d'environ 900 µm de diamètre) enfilés sur celle-ci et scellés dans le capteur.

Les références 52, 53 et 54 représentent respectivement un couvercle de protection 52, l'axe du tube 50, et le câble optique de déport.

B. Réalisation d'un ensemble préassemblé boîtier+raccords (dans le premier mode de réalisation)

Les raccords tubulaires (par exemple en acier inox, de diamètre environ 5 mm à 6 mm) sont découpés à des longueurs déterminées en fonction du diamètre de tube 60. A titre d'exemple, pour un tube de diamètre 30 cm (12 pouces), la longueur d'un raccord est d'environ 10 cm. Chaque raccord est soudé entre deux boîtiers de sorte que l'ensemble soit mécaniquement rigide.

A la différence des boîtiers B1 et B3, le boîtier principal B2 a pour fonction supplémentaire d'assurer la reprise d'effort du câble de déport 61. Pour cela, il incorpore une embase 63 destinée à effectuer le raccord de connexion du câble optique de déport 61, comme illustré sur les figures 5A et 5B.

Pour éviter la corrosion des aciers (câble, connecteurs, boîtiers), une protection par électrode consommable (en zinc, par exemple) est prévue pour l'intégralité des pièces métalliques du dispositif de

l'invention.

C. Préparation du câble optique de déport

Le câble optique de déport 61 est constitué
5 d'un tube d'acier inoxydable 64 (diamètre typique égal
à environ 2,8 mm) rempli de gel et pouvant contenir une
douzaine de fibres optiques monomodes 65, d'une
armature en fils 67 d'acier galvanisé (de diamètre
typique égal à environ 1 mm), séparés par des gaines
10 plastiques.

Dans le premier mode de réalisation, le
câble 61 peut être raccordé au boîtier central B₂ par
un montage dédié tel que celui représenté sur les
figures 5A et 5B, qui est classique pour un homme de
15 l'art.

Les fibres sont, tout d'abord, sorties de
ce câble 61 sur une longueur de 50 cm environ afin de
les engager dans les raccords tubulaires 64 et de
permettre des opérations de soudure optique, (dans le
20 second mode de réalisation, les fibres sont engagées
alors dans des guides polymères).

Les fils d'acier 67 servant d'armatures
sont alors épanouis et serrés mécaniquement dans un
montage en cône afin d'assurer la reprise d'effort. La
25 gaine 66 du câble optique 61 est ensuite serrée
mécaniquement pour empêcher ce câble de glisser.

Un polymère est, ensuite, collé sur le
câble 61 pour le solidariser avec l'extrémité de ce
montage pour former un raccord qui limite la fatigue
30 mécanique du câble en l'empêchant de travailler en
flexion lors des opérations de pose.

Dans le second mode de réalisation, la connexion entre les capteurs est faite par un câble de déport inclus dans le revêtement protecteur des capteurs. Ce câble connecte tous les capteurs d'une
5 portion instrumentée. La reprise d'effort et l'étanchéité de ce câble est assurée par une boîte de dérivation située en sommet de portion instrumentée. Cette boîte de dérivation peut également être chargée de redistribuer les fibres optiques du câble principal
10 aux câbles de déport le long des différentes portions instrumentées. La reprise d'effort du câble principal est effectuée par cerclage le long du tube. Comme illustré sur les figures 6A et 6B, la reprise d'effort d'un câble de déport 70 est faite par collage de celui-
15 ci dans le revêtement 73 des capteurs 71 à la surface du tube 72. Sur la figure 6B sont également représentées une protection fibre 74 et une épissure 75.

20 2. Adaptation de ces composants sur le tube

Si le tube est déjà calorifugé, celui-ci doit être décalorifugé localement sur les trois emplacements à instrumenter ainsi que sur les passages du cordon. Cette opération peut s'effectuer par
25 tournage sur une longueur de l'ordre de 1 à 2 mètres, ou par fraisage local pour ne dégager que les zones utiles. La surface de métal ainsi dégagée est ensuite avantageusement rectifiée pour éliminer tout défaut et toute oxydation superficielle.

30 Dans le premier mode de réalisation, l'ensemble pré-assemblé formé par trois boîtiers et les

raccords tubulaires est appliqué sur les zones découvertes et les trois boîtiers sont soudés par points sur le tube pour assurer la stabilité mécanique de l'ensemble et permettre la reprise d'effort du câble de déport, comme illustré sur les figures 5A et 5B. Le boîtier principal présente une épaisseur typique de l'ordre de 40mm. La rigidité des boîtiers rapportés est négligeable devant la rigidité du tube. Le comportement thermomécanique de ce tube ne se trouve donc pas modifié par la fixation de cet ensemble.

Dans le second mode de réalisation, les capteurs sont collés sur le tube ainsi que les fibres de déport qui sont protégées par des capillaires en polymère. La fibre de déport et les capteurs sont entièrement noyés dans un revêtement protecteur. Le câble de déport est relié à une boîte de dérivation permettant la connexion de ce câble de déport au câble optique principal. Le câble optique principal est maintenu sur le tube par cerclage afin d'assurer la reprise d'effort nécessaire.

3. Assemblage du tube instrumenté

Le câble de déport est, tout d'abord, raccordé sur le boîtier principal comme illustré sur les figures 5A et 5B. Les fibres sont ensuite réparties vers leurs différents emplacements. Les rosettes sont alors soudées aux fibres et l'excédent de fibre (ainsi que le manchon de protection de soudure) est enroulé et collé à l'intérieur des boîtiers dans le premier mode de réalisation ou noyés dans le revêtement dans le second mode de réalisation. Les rosettes peuvent être

collées sur la surface du tube à l'aide d'une colle époxy avec emploi d'une ceinture chauffante de très forte puissance thermique (typiquement 100 kW/m^2). Un couvercle rainuré 52, laissant entrer et sortir la fibre, est soudé ou collé sur la surface du tube, en recouvrant la plaquette d'acier 47 de la figure 4. Un polymère de remplissage, avantageusement en silicone, est injecté à l'intérieur 48 de ce couvercle.

Le silicone présente le double avantage de résister à des températures élevées (supérieure à 150°C) et d'absorber les vibrations sans transmettre les efforts mécaniques qui lui sont appliqués.

La plaquette d'acier 47 portant le réseau de température est ainsi maintenue tout en restant libre de se dilater.

La protection métallique du capteur de température est alors enrobée dans une colle de type époxy (chargée à l'inox par exemple) afin de garantir une étanchéité à la pression.

Dans le premier mode de réalisation, Les intérieurs des boîtiers sont ensuite remplis par un polymère d'enrobage rigide (résine époxy chargée inox par exemple). La partie supérieure de ces boîtiers est recouverte par ce polymère en réalisant l'étanchéité de l'ensemble de chaque boîtier ainsi que l'étanchéité intérieure avec les raccords et le câble. Les parties optiques ne sont alors pas sensibles à la pression hydrostatique externe mais seulement à la température et aux déformations. Le calorifuge est ensuite ré-injecté par-dessus les boîtiers et les raccords afin de rétablir la protection thermique.

Dans le second mode de réalisation, le revêtement recouvre le capteur et le câble optique de déport. Le calorifuge est ensuite ré-injecté sur ce revêtement. La partie optique de mesure de déformation
5 est alors sensible aux déformations du tube et à la pression hydrostatique externe.

4. Etalonnage

Les systèmes d'acquisition optoélectronique
10 permettant de mesurer les longueurs d'onde de Bragg des capteurs optiques à réseaux de Bragg sont connus.

A titre d'exemple, un premier système utilise une source optique à spectre large qui illumine tous les réseaux de Bragg présents sur la ligne de
15 mesure et une cavité interférométrique accordable (Fabry-Perot) qui permet de mesurer leurs spectres respectifs. Le calibrage en longueur d'onde est obtenu grâce à des réseaux de référence stabilisés (mécaniquement et en température) ce qui permet
20 d'obtenir une mesure de longueur d'onde absolue.

Un second système utilise également une source optique à spectre large, mais avec un filtre linéaire comme élément discriminateur en longueur d'onde. La mesure du ratio de transmission au travers
25 de ce filtre spectral calibré fournit l'information en longueur d'onde recherchée.

Ces systèmes présentent un temps de réponse compatible avec la détection d'un front de pression (inférieur à 0,1 s) dans le tube afin de permettre des
30 mesures du débit de fluide.

Un test fonctionnel du tube instrumenté

peut être réalisé afin de s'assurer que les parties optiques sont opérationnelles (bilan de liaison) et pour calibrer la réponse du tube en fonction du chargement. Il nécessite de placer la portion de tube instrumentée sur une machine d'essai mécanique telle que décrite dans le document référencé [4]. Cette machine permet d'exercer une contrainte de chargement (entraînant une déformation axiale) et des contraintes de flexion. La mesure de l'orientation de la flexion peut être testée en positionnant le tube en différentes positions angulaires par rapport au bâti de mesure.

Une fois les différentes étapes de montage du dispositif de l'invention exécutées, on peut alors effectuer les mesures et exploiter les résultats obtenus de la manière suivante.

1. Mesure des déformations principales

Chaque tube comporte au moins trois emplacements incluant chacun un capteur de type rosette à trois ou quatre jauges (trois jauges de mesure de déformation et éventuellement une jauge de mesure de température).

Un procédé de mesure des déformations principales à partir des déformations mesurées par chacune des jauges constituant une rosette est décrit dans le document référencé [3].

Une première jauge peut être collée approximativement selon l'axe du tube. En situation industrielle, les conditions de collage étant rarement bien contrôlées, il subsiste souvent une petite erreur

de positionnement due en particulier au glissement lors du collage à haute température (lorsque la colle époxy devient très fluide). Il subsiste alors généralement un certain angle entre l'axe z du tube et la position
 5 finale du capteur après collage. Soit α cet angle entre la direction principale orientée selon l'axe du tube et cette première jauge.

Les déformations principales sont déterminées, indépendamment de cet angle α , en
 10 résolvant le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} \varepsilon_t = \frac{d+r}{2} \\ \varepsilon_z = \frac{d-r}{2} \end{cases} \quad (1)$$

Les paramètres d et r, appelés
 15 respectivement "partie sphérique" et "déviateur", sont donnés dans le tableau ci-dessous pour les deux configurations de rosettes les plus courantes (45° et 120°). Chaque emplacement de mesure fournit trois déformations ε_a , ε_b , ε_c . Pour chaque emplacement, on en
 20 déduit ε_t et ε_z . Dans la suite, on appelle $\varepsilon_1 = \varepsilon_{z1}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{z2}$ et $\varepsilon_3 = \varepsilon_{z3}$ les trois composantes de déformations axiales.

Type de rosette à trois jauges	Rosette à 120°	Rosette à 45°
Partie sphérique	$3.d = \varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c$	$2.d = \varepsilon_b + \varepsilon_c$

(d)		
Déviateur (r)	$3.r = \frac{\varepsilon_b + \varepsilon_c - 2.\varepsilon_a}{\cos(2.\alpha)}$	$r = \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_c}{2.\cos(2.\alpha)}$
Inclinaison rosette-axe principal	$\text{tg}(2.\alpha) = \sqrt{3} \cdot \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_c}{2.\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}$	$\text{tg}(2.\alpha) = \frac{d - \varepsilon_a}{\varepsilon_b - d} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_b - 2.\varepsilon_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_c}$
Fonction déviateur	$r_{120} = \frac{1}{3} \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_c) \cdot \sqrt{3 + \left(2 \cdot \frac{(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} - 1 \right)^2}$	$r_{45} = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_c) \cdot \sqrt{1 + \left[2 \cdot \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_b - \varepsilon_c} - 1 \right]^2}$

2. Calcul de la pression statique de fluide et de la déformation axiale à partir des déformations principales des différents capteurs

Les tubes utilisés en production pétrolière sont caractérisés par un faible rapport épaisseur-sur-rayon, de valeur typique minimale 1/20. Le chargement axial ou la flexion se manifeste principalement par une déformation axiale accompagnée d'une déformation transverse (loi de Poisson). De même, les variations de pressions interne et externe se manifestent principalement par une déformation transverse accompagnée d'une déformation axiale.

Soit P_f la pression interne du fluide. Le différentiel de pression entre les parties interne et externe du tube est noté $P = P_f - P_e$. La déformation transverse induite par ce différentiel de pression P sur le tube aux extrémités encastrées s'écrit alors :

$$\varepsilon_t = \frac{P.R}{E.t} \left(\frac{2-\nu}{2} \right) = K.P \quad (2)$$

où R est le rayon moyen du tube, t son épaisseur,
 où E est le module d'Young de l'acier du tube (environ
 5 193 GPa) et ν est son coefficient de poisson ($\nu \sim 0,29$),
 cette loi étant donnée à titre indicatif.

En pratique, un étalonnage en pression est
 réalisé afin de déterminer la valeur expérimentale du
 coefficient K à prendre en compte.

10 Dans ce qui suit, on considère le premier
 mode de réalisation. Pour simplifier le calcul d'auto-
 compensation thermique, les déformations principales ε_t
 et ε_z sont converties en décalages de longueur d'onde
 $\Delta\lambda_t$ et $\Delta\lambda_z$ selon $\Delta\lambda_t = (1-p_e) \cdot \varepsilon_t \cdot \lambda_t$ et $\Delta\lambda_z = (1-p_e) \cdot \varepsilon_z \cdot \lambda_z$.
 15 Ces décalages n'ont pas de réalité physique et servent
 de base de calcul. Le comportement thermomécanique d'un
 tube de faible épaisseur, encastré à ses extrémités,
 soumis simultanément à un différentiel de pression
 (interne-externe) P, à une déformation axiale ε et à
 20 une variation de température ΔT (par rapport à une
 température de référence), se traduit par le système
 d'équations suivant:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_t = (1-p_e) \cdot \lambda_t \cdot [K.P - \nu \cdot \varepsilon] + \lambda_t \cdot [(1-p_e) \cdot \alpha + \xi] \Delta T \\ \Delta\lambda_z = (1-p_e) \cdot \lambda_z \cdot [K'.P + \varepsilon] + \lambda_z \cdot [(1-p_e) \cdot \alpha + \xi] \Delta T \end{cases} \quad (3)$$

25

dans lequel on introduit le second paramètre

$$K' = K \cdot \frac{(1-2\nu)}{(2-\nu)} \quad (4)$$

Une mesure supplémentaire de la température est obtenue par le réseau de mesure de température collé sur support acier (mode d'auto-compensation thermique). La longueur d'onde de ce réseau évolue
 5 selon la relation:

$$\Delta\lambda_r = \lambda_r \cdot [(1 - p_e) \cdot \alpha + \xi] \Delta T \quad (5)$$

10 où p_e est le coefficient photo-élastique de la silice (0,22), α est le coefficient de dilatation thermique de l'acier ($11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ pour de l'acier X52) et ξ est le coefficient thermo-optique de la silice (environ $7 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Une telle réalisation présente l'avantage
 15 d'une sensibilité en température supérieure (d'un facteur 2 environ) à celle d'un réseau de Bragg libre (non collé), ce qui permet d'améliorer la précision de mesure de température par rapport à la méthode de correction.

20 L'équation (3) montre que la pression et la déformation sont liées par un système matriciel (de matrice M) aux longueurs d'onde mesurées, selon la loi :

$$25 \quad \begin{pmatrix} \Delta\lambda_t - \frac{\lambda_t}{\lambda_r} \cdot \Delta\lambda_r \\ \Delta\lambda_z - \frac{\lambda_z}{\lambda_r} \cdot \Delta\lambda_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P \\ \varepsilon \end{pmatrix} \quad (6)$$

La détermination des paramètres P et ε nécessite ainsi d'inverser la relation (6).

Dans le cas de la méthode d'auto-compensation thermique, la longueur d'onde du réseau de mesure de température est prise comme nouvelle référence spectrale, la mesure de température étant elle-même référencée par rapport à un réseau de référence thermalisé placé dans l'unité d'acquisition située à la surface. En pratique, les termes $\frac{\lambda_t}{\lambda_r}$ et $\frac{\lambda_z}{\lambda_r}$ sont généralement très proches de 1 (à ± 2 %). On effectue alors le changement de variables suivant:

10

$$\begin{cases} \lambda_t' = \lambda_t - \lambda_r \\ \lambda_z' = \lambda_z - \lambda_r \end{cases} \quad (7)$$

L'inversion de cette matrice 2x2 fournit la matrice expérimentale de calibrage Ci suivante:

15

$$\begin{pmatrix} P \\ \varepsilon \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\lambda_t' \\ \Delta\lambda_z' \end{pmatrix} \quad (8)$$

Pour laquelle les coefficients sont donnés

20 par :

$$\begin{cases} C_{11} = \frac{E.t}{(1-p_e).\lambda_t.R.(1-v^2)} \\ C_{12} = \frac{E.t.v}{(1-p_e).\lambda_z.R.(1-v^2)} \\ C_{21} = \frac{-(1-2.v)}{2.(1-p_e).\lambda_t.(1-v^2)} \\ C_{22} = \frac{(2-v)}{2.(1-p_e).\lambda_z.(1-v^2)} \end{cases} \quad (9)$$

Chaque boîtier est caractérisé par sa

matrice de calibrage. La résolution de ces systèmes permet d'obtenir les valeurs de différentiel de pression et de température de fluide, ainsi que les déformations axiales ε_1 , ε_2 , ε_3 , indépendamment de l'orientation des capteurs sur le tube. La profondeur h de l'eau étant connue, la pression externe s'en déduit selon la relation P_e (bar) $\sim 0,1 \cdot h$ (m). La pression interne du fluide P_f est alors déduite selon la relation $P_f = P + P_e$.

Dans le second mode de réalisation, les capteurs sont sensibles aux déformations induites par le différentiel de pression interne-externe, mais aussi à la pression hydrostatique externe. Leur comportement peut alors être traduit par une relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_t - \frac{\lambda_t}{\lambda_T} \cdot \Delta\lambda_T - c \cdot P_e \\ \Delta\lambda_z - \frac{\lambda_z}{\lambda_T} \cdot \Delta\lambda_T - c \cdot P_e \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P \\ \varepsilon \end{pmatrix} \quad (10)$$

Cette relation fait intervenir la même matrice que la relation (6), l'effet de la pression hydrostatique s'exerçant de façon identique sur les deux composantes de mesure λ_t et λ_z . Dans ce second mode de réalisation, il est ainsi nécessaire de connaître la pression hydrostatique externe, soit en connaissant la profondeur d'eau, soit grâce à un capteur de pression supplémentaire, afin de soustraire son effet sur la mesure des paramètres P et ε . La

résolution du système s'effectue également selon la relation (8).

La matrice de calibrage C_i est donnée à titre d'exemple pour une configuration d'encastrement du tube (conditions limites). En réalité, l'étalonnage a lieu après installation du tube avec des paramètres légèrement différents.

3. Calcul du chargement et de la flexion

La mesure des trois déformations axiales ε_1 , ε_2 , ε_3 permet de séparer la contribution de déformation ε due au chargement de la flexion imposée au tube. Cette flexion est caractérisée par un rayon de courbure ρ et par son orientation angulaire Ψ par rapport au boîtier central. On considère, à titre d'exemple, le cas d'une répartition des emplacements tous les 60° comme illustré sur la figure 2. Les trois paramètres ε , ρ et Ψ sont reliés par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon + \frac{\Phi}{2\rho} \cdot \cos \psi \\ \varepsilon_2 = \varepsilon + \frac{\Phi}{2\rho} \cdot \cos \left(\psi + \frac{\pi}{3} \right) \\ \varepsilon_3 = \varepsilon + \frac{\Phi}{2\rho} \cdot \cos \left(\psi - \frac{\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (11)$$

où Φ est le diamètre externe du tube.

Ce système d'équations est similaire à celui des rosettes « delta » à trois jauges utilisées en analyse de déformations sur structures planes.

Ce système à trois équations permet de déterminer les trois inconnues (ε , ρ et Ψ). La

déformation axiale s'écrit:

$$\varepsilon = \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_1 \quad (12)$$

5 L'angle Ψ peut être déterminé par la relation:

$$\operatorname{tg}(\Psi) = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{\sqrt{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon)} \quad (13)$$

10 Connaissant Ψ et ε , on en déduit le rayon de courbure local ρ grâce à la première équation du système (11), en appliquant la relation trigonométrique bien connue:

$$15 \quad \cos(\Psi) = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}(\Psi)^2}} \quad (14)$$

Connaissant la déformation de chargement ε , on peut en déduire la condition de chargement du tube d'après la relation de Hooke appliquée à la section
20 locale du tube :

$$F = E.S.\varepsilon \sim \frac{\pi}{2} . \Phi . t . E . \varepsilon \quad (15)$$

25 Pour un tube en acier de 300 mm de diamètre et de 19 mm d'épaisseur, la relation entre la force F et la déformation est de l'ordre de 177 kg/microdéformation.

4. Détermination du débit par détection du profil de pression

Contrairement à une mesure de pression statique, une mesure des variations de pression ne
5 nécessite pas de compensation thermique, ni de compensation de l'effet de chargement (inversion de la matrice de calibrage Ci). En effet, la température et le chargement axial évoluent lentement du fait de l'inertie de la structure de sorte que la mesure des
10 surpressions peut s'effectuer directement en considérant préférentiellement les jauges collées transversalement (pour lesquelles les coefficients de sensibilités en pression sont les plus élevés).

La répartition des boîtiers en différentes
15 positions selon l'axe du tube permet de réaliser un « débitmètre optique » qui utilise l'auto-corrélation ("cross-correlation") des mesures de variations de pression dans le temps, tel que décrit dans le document référencé [5]. Ce document décrit, en effet, le
20 principe d'une mesure de débit par auto-corrélation, en plaçant au moins trois capteurs de pression P_1 , P_2 et P_3 en différentes abscisses le long d'un tube et en observant l'évolution des différences de pressions P_1-P_2 et P_2-P_3 en fonction du temps. On calcule alors la
25 fonction d'autocorrélation entre ces deux différences de pression (sur une fenêtre temporelle typique de 2 secondes) afin d'en déduire la durée de propagation des surpression de vortex à l'intérieur du fluide. L'autocorrélation ainsi réalisée permet de s'affranchir
30 des perturbations de pressions acoustiques de longueurs d'onde plus grandes que l'intervalle entre boîtiers

(effet de filtrage spatial). Connaissant la distance moyenne entre les deux prises de pressions, on peut en déduire le débit de fluide de façon non-intrusive (sans avoir à générer d'effet Venturi).

REFERENCES

- [1] US 5,218,197
- 5 [2] "Development of an optical monitoring system for flexible risers" de M. Andersen, A. Berg et S. Saevik (Offshore Technology Conference (OTC), 13201, Houston (TX), 30 avril - 3 mai 2001)
- 10 [3] US 5,726,744
- [4] "Intelligent pipelines using fiber optics sensors" de RC. Tennyson, W.D. Morison, et G Manuelpillai (SPIE, Smart structures and materials, San Diego, 2-6 mars 15 2003, vol. 5050, pages 295-304)
- [5] US 6,536,291

REVENDICATIONS

1. Dispositif tubulaire instrumenté pour le transport d'un fluide sous pression comprenant un tube
5 (20) dans lequel circule ce fluide auquel sont associés des moyens de mesure des déformations principales de ce tube, et des moyens de mesure de la température du fluide dans le tube, caractérisé en ce que ce tube est équipé de ces moyens de mesure solidaires de sa surface
10 et déportés par au moins un câble optique de déport vers un système de mesure optoélectronique, en ce que ces moyens de mesure sont des moyens d'assemblage d'au moins deux fibres optiques non parallèles qui comprennent au moins trois ensembles (B1, B2 et B3)
15 d'au moins deux jauges optiques à réseaux de Bragg, ces au moins trois ensembles étant fixés en au moins trois emplacements (22) de mesure répartis le long du tube, reliés entre eux (24) et reliés au câble optique de déport (23) par des fibres optiques, et en ce qu'au
20 moins un ensemble comprend, en outre, une jauge de température.

2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel les moyens de mesure sont préassemblés sur
25 un support.

3. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel les moyens de mesure sont fixés directement sur le câble de déport (23).

4. Dispositif selon la revendication 1, dans lesquels les moyens de mesure sont assemblés pour former au moins une rosette.

5 5. Dispositif selon la revendication 4, dans lequel chaque rosette forme un capteur flexible à deux dimensions.

6. Dispositif selon la revendication 1,
10 dans lequel chaque ensemble comprend trois jauges de mesure des déformations du tube.

7. Dispositif selon la revendication 5, dans lequel chaque capteur comprend une partie de
15 mesure des déformations (40), et une partie de mesure de la température (45).

8. Dispositif selon la revendication 7, dans lequel la partie de mesure des déformations (40)
20 est constituée d'une fibre optique monomode(41), sur laquelle ont été photo-inscrits des réseaux de Bragg (42,43 et 44), enroulée et maintenue collée entre deux feuilles, les entrées-sorties de fibre étant protégées par des capillaires (51).

25

9. Dispositif selon la revendication 8, dans lequel les parties de fibre comportant les réseaux de Bragg (42,43 et 44) sont découvertes.

30 10. Dispositif selon la revendication 7, dans lequel la partie de mesure de la température (45)

comprend un réseau de Bragg (46) collé sur une plaquette métallique (47).

11. Dispositif selon la revendication 10,
5 dans lequel la plaquette métallique est de même nature que le métal du tube.

12. Dispositif selon la revendication 5,
qui comprend au moins trois boîtiers de mesure (B1, B2,
10 B3), dans lesquels sont disposés respectivement trois capteurs, isolés de la pression hydrostatique externe et reliés par des raccords tubulaires (24).

13. Dispositif selon la revendication 12,
15 dans lequel le boîtier central (B2) est relié à l'instrumentation de mesure par un câble optique de déport (23).

14. Dispositif selon la revendication 12,
20 dans lequel les boîtiers et les raccords sont soudés entre eux pour former un ensemble rigide.

15. Dispositif selon la revendication 12,
dans lequel le câble de déport (61) est composé d'un
25 tube d'acier inoxydable (64) rempli de gel et contenant plusieurs fibres optiques monomodes (65), d'une armure en fils d'aciers (67) séparés par des gaines de plastique.

30 16. Dispositif selon la revendication 15,
dans lequel le boîtier central (B2) incorpore une

embase (63) destinée à effectuer le raccord de connexion du câble optique de déport (61).

17. Dispositif selon la revendication 5,
5 qui comprend au moins un ensemble de trois capteurs (71) recouverts d'un revêtement de protection (73).

18. Dispositif selon la revendication 17,
dans lequel le revêtement (73) est un revêtement
10 polymère d'épaisseur comprise entre 3 et 4 centimètres.

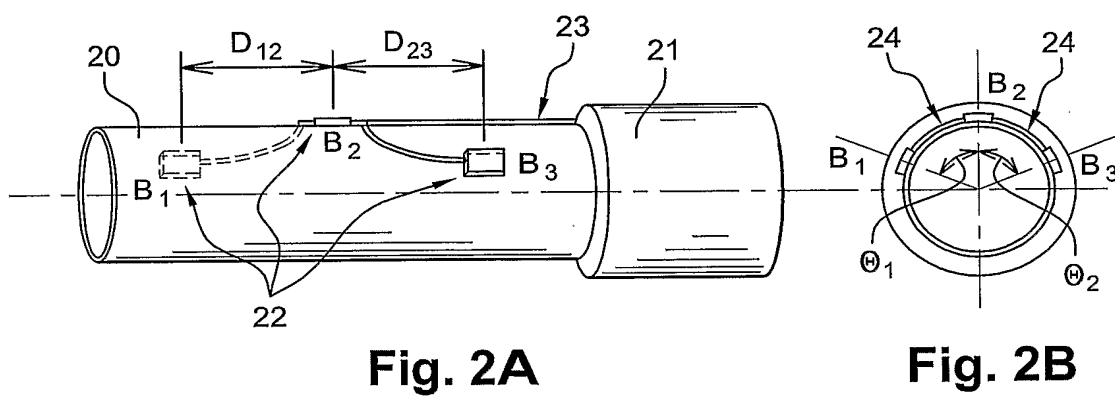
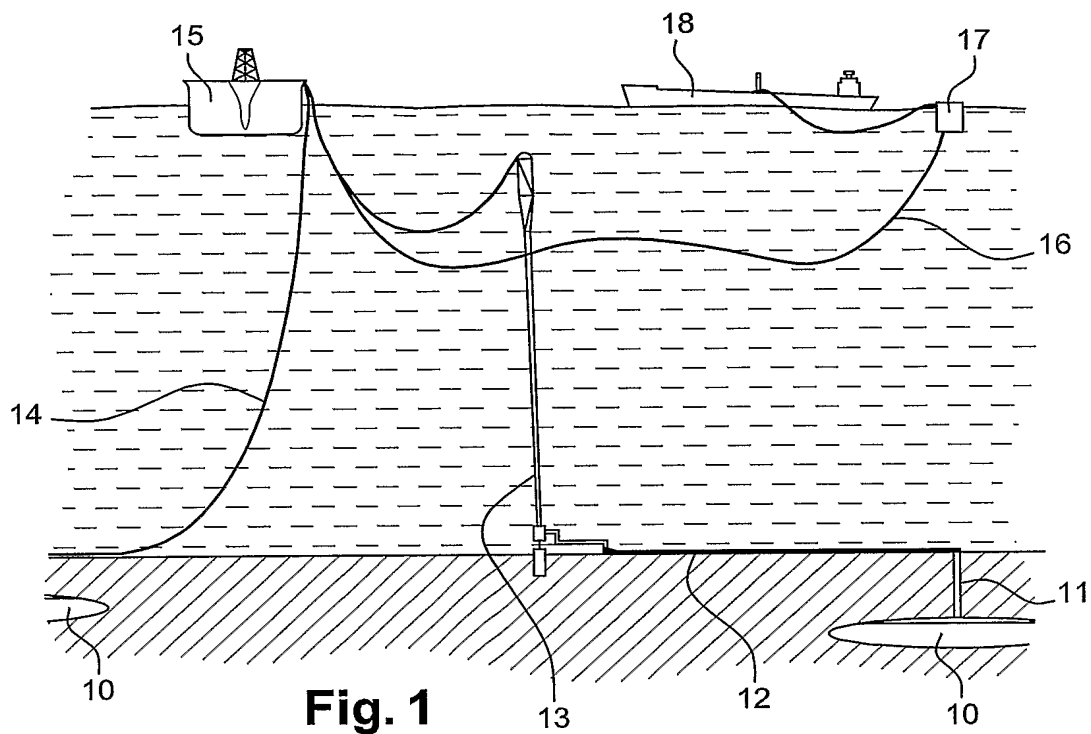
19. Dispositif selon la revendication 17,
dans lequel une boîte de dérivation effectue la liaison
entre les capteurs de chaque ensemble et un câble
15 optique principal relié à l'instrumentation de mesure.

20. Dispositif selon la revendication 17,
dans lequel la reprise d'effort sur le câble principal
est effectuée par cerclage de ce câble le long du tube.
20

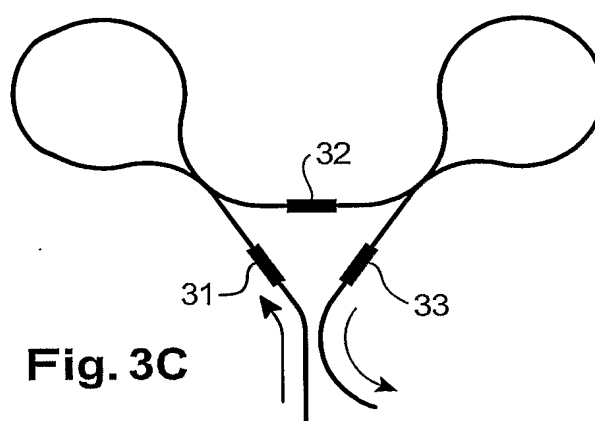
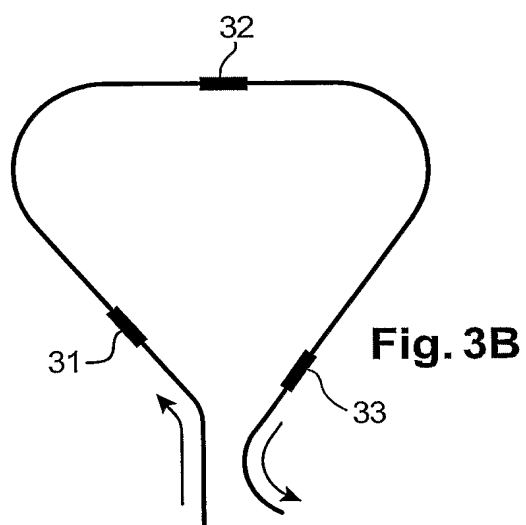
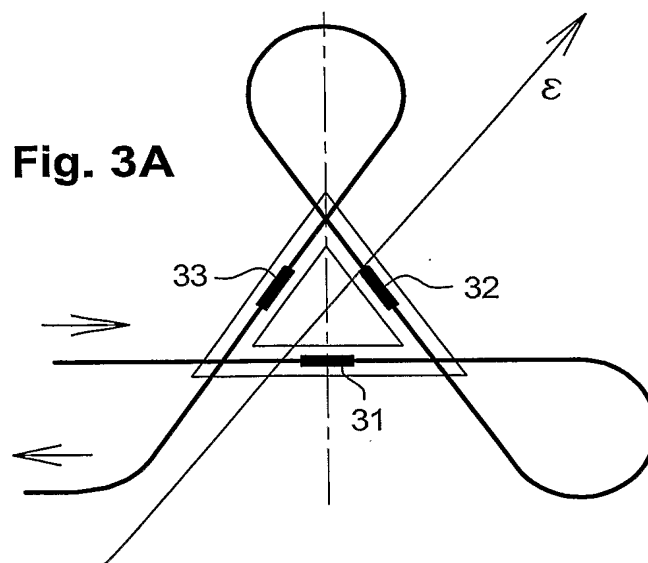
21. Dispositif selon la revendication 17,
dans lequel le câble de déport est inclus dans le
revêtement de protection.

22. Dispositif selon l'une quelconque des
25 revendications précédentes, dans lequel le fluide
transporté est un gaz ou un hydrocarbure.

1 / 4



2 / 4



3 / 4

Fig. 4A

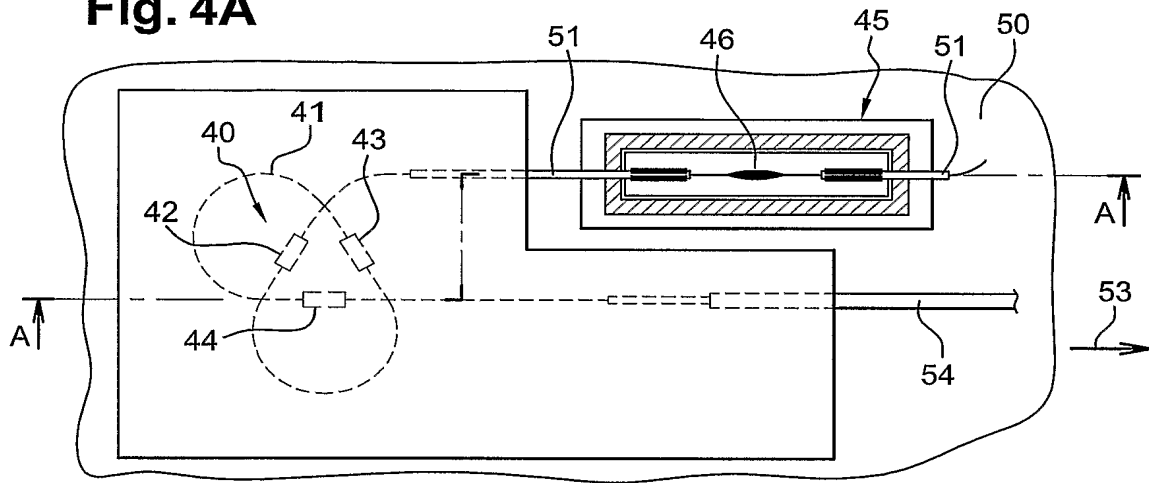
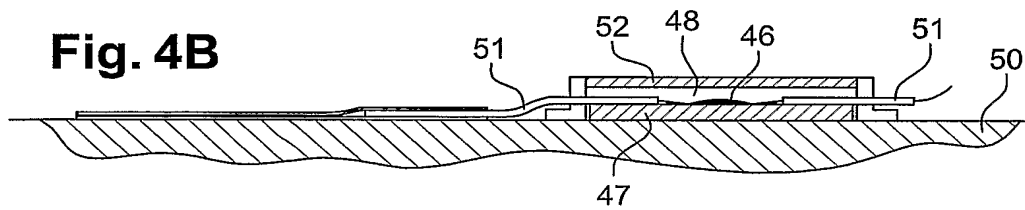


Fig. 4B



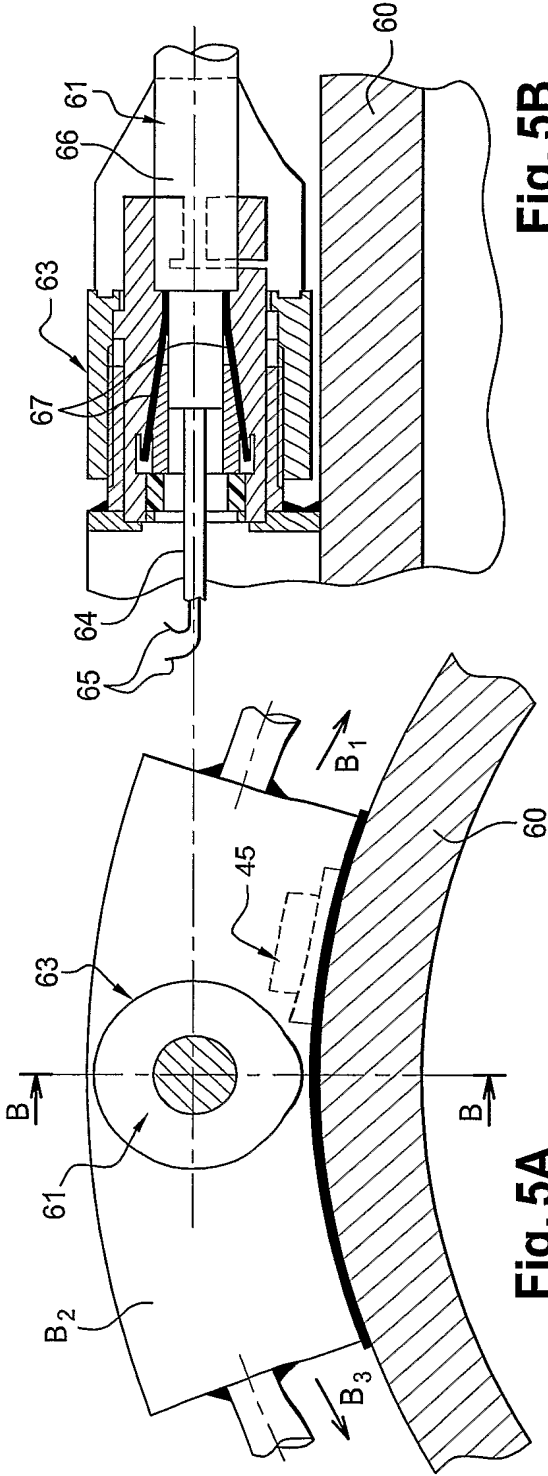


Fig. 5B

Fig. 5A

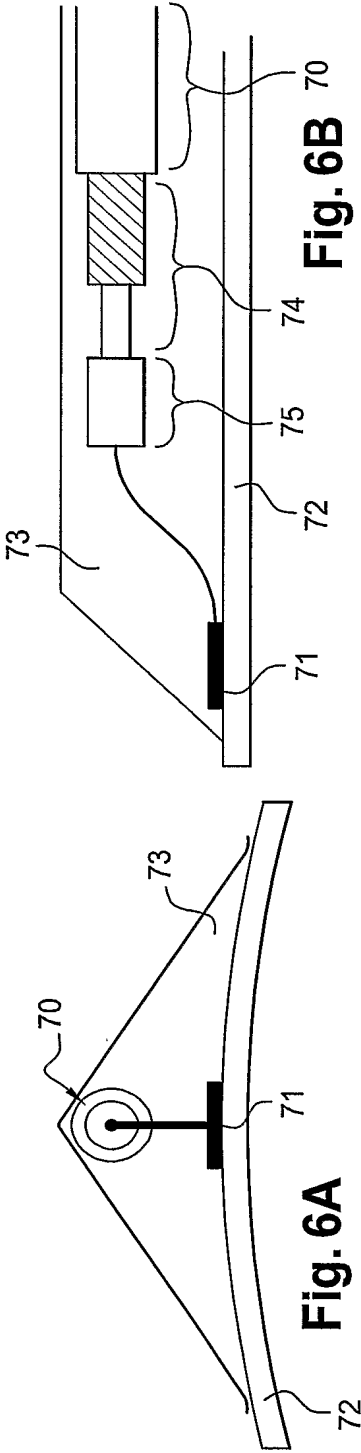


Fig. 6B

Fig. 6A

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/FR2004/050736

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G01L1/24 F17D5/00 E21B17/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01L F17D E21B G01B G01D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 03/076887 A (LIGHT STRUCTURES) 18 September 2003 (2003-09-18) page 8, line 12 - line 24; figures 1B,4	1
A	EP 1 296 117 A (M. VOET) 26 March 2003 (2003-03-26) column 5, line 35 - line 40; figure 3	
A	US 6 644 848 B1 (ABB OFFSHORE) 11 November 2003 (2003-11-11) column 4, line 14 - line 57 column 5, line 39 - line 52; figure 1	
A	US 5 726 744 A (CEA) 10 March 1998 (1998-03-10) cited in the application figure 3A	
	----- -/-	



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

T later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

X document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

Y document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

* & * document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

2 May 2005

Date of mailing of the international search report

17/05/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Mielke, W

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR2004/050736

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 892 250 A (BA) 20 January 1999 (1999-01-20) figure 4	
A	US 6 586 722 B1 (EC) 1 July 2003 (2003-07-01) figure 7	
A	US 6 450 037 B1 (CIDRA) 17 September 2002 (2002-09-17) figure 8	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR2004/050736

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 03076887	A	18-09-2003	NO 20021257 A AU 2003212719 A1 GB 2405202 A WO 03076887 A1	15-09-2003 22-09-2003 23-02-2005 18-09-2003
EP 1296117	A	26-03-2003	BE 1014373 A6 EP 1296117 A1	02-09-2003 26-03-2003
US 6644848	B1	11-11-2003	AU 4279199 A BR 9910976 A EP 1086336 A1 WO 9964781 A1 NO 20006301 A	30-12-1999 13-02-2001 28-03-2001 16-12-1999 12-02-2001
US 5726744	A	10-03-1998	FR 2727203 A1 CA 2162954 A1 DE 69521971 D1 DE 69521971 T2 EP 0713084 A2	24-05-1996 19-05-1996 06-09-2001 04-04-2002 22-05-1996
EP 0892250	A	20-01-1999	GB 2326471 A DE 69816534 D1 DE 69816534 T2 EP 0892250 A1 ES 2198652 T3 JP 2975591 B2 JP 11072353 A US 6125216 A	23-12-1998 28-08-2003 03-06-2004 20-01-1999 01-02-2004 10-11-1999 16-03-1999 26-09-2000
US 6586722	B1	01-07-2003	AT 252725 T CA 2336193 A1 DE 69912301 D1 DE 69912301 T2 DK 1129327 T3 EP 1129327 A1 ES 2209522 T3 WO 0028294 A1 JP 2002529728 T NO 20006354 A PT 1129327 T	15-11-2003 18-05-2000 27-11-2003 29-07-2004 01-03-2004 05-09-2001 16-06-2004 18-05-2000 10-09-2002 23-02-2001 31-03-2004
US 6450037	B1	17-09-2002	AU 754039 B2 CA 2335469 A1 CN 1307678 A ,C EP 1099101 A1 NO 20006621 A WO 0000799 A1 US 2003038231 A1 AU 5457799 A	31-10-2002 06-01-2000 08-08-2001 16-05-2001 07-02-2001 06-01-2000 27-02-2003 17-01-2000

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

PCT/FR2004/050736

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

CIB 7 G01L1/24 F17D5/00 E21B17/00

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G01L F17D E21B G01B G01D

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	WO 03/076887 A (LIGHT STRUCTURES) 18 septembre 2003 (2003-09-18) page 8, ligne 12 - ligne 24; figures 1B,4 -----	1
A	EP 1 296 117 A (M. VOET) 26 mars 2003 (2003-03-26) colonne 5, ligne 35 - ligne 40; figure 3 -----	
A	US 6 644 848 B1 (ABB OFFSHORE) 11 novembre 2003 (2003-11-11) colonne 4, ligne 14 - ligne 57 colonne 5, ligne 39 - ligne 52; figure 1 -----	
A	US 5 726 744 A (CEA) 10 mars 1998 (1998-03-10) cité dans la demande figure 3A -----	
	-/-	

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

° Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

T document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

X document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

Y document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

Z document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

2 mai 2005

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

17/05/2005

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Mielke, W

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

PCT/FR2004/050736

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	EP 0 892 250 A (BA) 20 janvier 1999 (1999-01-20) figure 4 -----	
A	US 6 586 722 B1 (EC) 1 juillet 2003 (2003-07-01) figure 7 -----	
A	US 6 450 037 B1 (CIDRA) 17 septembre 2002 (2002-09-17) figure 8 -----	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale No

PCT/FR2004/050736

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 03076887	A	18-09-2003	NO 20021257 A	15-09-2003
			AU 2003212719 A1	22-09-2003
			GB 2405202 A	23-02-2005
			WO 03076887 A1	18-09-2003
EP 1296117	A	26-03-2003	BE 1014373 A6	02-09-2003
			EP 1296117 A1	26-03-2003
US 6644848	B1	11-11-2003	AU 4279199 A	30-12-1999
			BR 9910976 A	13-02-2001
			EP 1086336 A1	28-03-2001
			WO 9964781 A1	16-12-1999
			NO 20006301 A	12-02-2001
US 5726744	A	10-03-1998	FR 2727203 A1	24-05-1996
			CA 2162954 A1	19-05-1996
			DE 69521971 D1	06-09-2001
			DE 69521971 T2	04-04-2002
			EP 0713084 A2	22-05-1996
EP 0892250	A	20-01-1999	GB 2326471 A	23-12-1998
			DE 69816534 D1	28-08-2003
			DE 69816534 T2	03-06-2004
			EP 0892250 A1	20-01-1999
			ES 2198652 T3	01-02-2004
			JP 2975591 B2	10-11-1999
			JP 11072353 A	16-03-1999
			US 6125216 A	26-09-2000
US 6586722	B1	01-07-2003	AT 252725 T	15-11-2003
			CA 2336193 A1	18-05-2000
			DE 69912301 D1	27-11-2003
			DE 69912301 T2	29-07-2004
			DK 1129327 T3	01-03-2004
			EP 1129327 A1	05-09-2001
			ES 2209522 T3	16-06-2004
			WO 0028294 A1	18-05-2000
			JP 2002529728 T	10-09-2002
			NO 20006354 A	23-02-2001
			PT 1129327 T	31-03-2004
US 6450037	B1	17-09-2002	AU 754039 B2	31-10-2002
			CA 2335469 A1	06-01-2000
			CN 1307678 A ,C	08-08-2001
			EP 1099101 A1	16-05-2001
			NO 20006621 A	07-02-2001
			WO 0000799 A1	06-01-2000
			US 2003038231 A1	27-02-2003
			AU 5457799 A	17-01-2000